覆膜滴灌对温室番茄土壤理化性状及其生物学特性的影响

王京伟[1,2]，王磊元[3]，李元[2,4]，牛文全[2,5※]

（1. 山西财经大学资源环境学院，山西 太原 030006；2. 西北农林科技大学水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；3. 山西财经大学公共管理学院，山西 太原 030006；4. 陕西师范大学西北国土资源研究中心，陕西 西安 710119；5. 中国科学院 水利部水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；）

摘要：为探明覆膜滴灌条件下，作物根区土壤水、盐运移规律及其对“土壤-微生物及酶-根系”交互作用的影响，进一步提高水肥利用效率和完善精确灌溉制度，本文以温室番茄为研究对象，采用 Field TDR 200 对根区土壤水盐运移进行动态监测，研究常规滴灌和覆膜滴灌对水盐运移、根系、土壤微生物及酶活性的影响，分析根区土壤环境因子、土壤微生物及酶、根长密度的交互作用。结果表明：覆膜滴灌土壤水分迁移速率显著低于常规滴灌，水分分布相对均匀，且测定范围内土壤含水率≥灌水下限（22%）土壤面积为常规滴灌 5 倍（P<0.05）；局部盐分聚集速率减小 50%，降低局部盐分聚集度；显著提高土壤温度和降低土壤 pH；根区表层土壤根长密度为常规滴灌的 12.8~28.5 倍。这些环境因子的改变，进一步增强“土壤-微生物及酶-根系”交互作用，土壤脲酶活性提高 20.83%~30.61%，磷酸酶活性提高 76.92%~84.61%。因此，覆膜滴灌比常规滴灌更具水土资源利用效率提升潜力，相关农艺措施需进一步精细和完善，这可为提高干旱区设施农业水土资源利用效率提供支持。

关键词：覆膜；滴灌；土壤微生物；土壤酶；根长密度

旱区农业生产中，覆膜滴灌技术应用越来越普遍。滴灌将水以滴状，均匀、定时、定量直接浸润作物根系[1]，土壤垂直受水面积小而侧向浸润土体面积比增大[2]。水滴进入土壤后溶解盐分，盐分随水分向滴头周围土壤迁移[3]。覆膜减少水分蒸发，抑制盐分向上迁移[4]。因此，覆膜滴灌形成的作物根区土壤环境显著不同于常规灌溉[5]。覆膜滴灌为局部灌溉，其流量小、灌水频率高[6]及覆膜保墒的特点会造成根区土壤干湿交替频繁[7]，可能会强化土壤水、盐、温度等环境因素时空分布异质性[8]，影响土壤养分循环[9]，对作物根系生长造成影响。

作物根区土壤、根系、微生物及酶组成是一个动态变化的微环境[10]。土壤酶是土壤养分代谢的重要动力[11]，在较短时间内反映环境质量变化[12]，是评价土壤肥力和质量的重要指标[13]。研究表明，土壤酶与微生物、作物根系密切相关[14]，同时受根区土壤水、盐、热等影响和制约[15-17]。三者之间相互作用是作物吸收水分、养分的土壤内在驱动机制[18]，影响作物生长。然而，已有研究更多关注覆膜滴灌水盐运移、水肥分布及其对作物生长的影响[19-20]，较少涉及作物根区微域土壤环境水分、盐分、温度时空异质性对土壤微生物、土壤酶和根系生长的影响。

本文以常规滴灌为对照，研究覆膜滴灌根区土壤环境因素的时空异质性对土壤微生物、土壤酶活性、根系生长的影响，分析“土壤-微生物及酶-根系”之间相互作用，为提高水土资源利用效率，完善和发展精确灌溉等提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验地 108°08′E， 34°16′N，海拔 521 m，年平均气温 16.3 ℃，降水量 535.6 mm，日照时

收稿日期:2019-09-27；**修订日期**:2019-12-06
基金项目:国家自然科学基金项目（51679205）;国家重点研发计划项目（2016YFC0400202）资助
作者简介：王京伟(1982-)，男，博士，研究方向为水土资源高效利用.Email：wjwlssks@163.com;
通信作者：牛文全.Email：nwq@nwsuaf.edu.cn;

数 2 163 h，无霜期 210 d。供试土壤为陕西杨凌塿土，其物理特性如表 1.

表1 土壤物理特性参数

Table 1 Soil physical properties

容重/g·cm^{-3}	pH	土壤孔隙度/%	土壤组成/%		
			砂粒（2～0.02 mm）	粉粒 (0.02～0.002 mm)	粘粒 (<0.002 mm)
1.35	7.82	49.38	25.4	44.1	30.5

试验于 2014 年 10 月至 2015 年 5 月在陕西杨凌区大寨乡设施温室内进行。 温室东西长 108 m，南北宽 8 m。试验作物为番茄 “海地”。温室内从西向东划分种植小区，起双垄，小区面积 3.6 m^2（长 6.0 m，垄面宽 0.6 m，高 0.2 m，沟宽 0.3 m）。试验设置常规、覆膜地面滴灌 2 个处理。 覆膜滴灌铺设白色透光高压低密度聚乙烯地膜(江苏靖江市新丰塑料厂)，膜厚 0.014 mm。每处理 3 个重复，共 6 个试验小区。每小区双行定植番茄 34 株，植株间距 0.30 m。滴灌带位于番茄行距中间，滴头间距 30 cm，每个滴头在两行的两个植株之间；滴灌带为内镶扁平式（甘肃大禹节水集团股份有限公司），直径 16 mm，壁厚 0.3 mm，工作压力 0.1 MPa，滴头流量 1.2 L·h^{-1}。根据本课题组前期试验结果及当地农民生产实践，灌水量为田间持水量 70% 即可满足番茄生长需求，因此，试验设置灌水上、下限为田间持水量 75% 和 70%。为防止水分侧渗，试验小区之间用塑料膜隔离。

番茄定植后，在每个试验小区随机选择滴灌带的一个滴头作为定点，在定点布设 1 根深度为 100 cm 探管，探管紧贴滴头外侧，沿垂直于滴灌带方向依次由定点向外再布设 2 根探管。3 根探管呈直线与滴灌带垂直分布，探管间距 15 cm，监测土壤水盐运移。

1.2 测定指标

1.2.1 土壤水分、盐分

采用 Field TDR 200（美国 Spectrum 公司生产）进行土壤水分、盐分（电导率）监测，将探头放入探管按 10 cm 等间隔测定，深度测至 60 cm。土壤含水率达下限时，按湿润层 40 cm 补充水分。灌水量计算公式:

$$M = s\rho_b rh\theta_f\left(q_1 - q_2\right)/\eta$$

式中，M 为灌水量，m^3；s 为计划湿润面积，m^2；ρ_b 为土壤容积密度，1.35 g·m^{-3}；r 为湿润比，取值 0.80；h 为湿润层深度，取值 0.40 m；θ_f 为田间最大持水量，31.54%；q_1、q_2 为灌水上限、土壤实测含水率，%；η 为水分利用系数，0.95。

每试验小区根据监测情况，分别进行水分控制和灌水；灌水后第 1 d、3 d、6 d、11 d 进行土壤含水率、盐分监测。连续监测 6 周期，取平均值。

1.2.2 土壤温度、pH

土壤温度用地温计测定，每试验小区随机选择一个滴头，距滴头垂直距离 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm、30 cm 处分别布设地温计。灌水后第 1 d、3 d、6 d、11 d 进行监测。测定时间为 10:00，取平均值（℃）。

灌水周期内，灌水后第 1 d、3 d、6 d、11 d，每试验小区随机选择一个滴头，距滴头垂直距离 5 cm、10 cm、15 cm、20 cm、25 cm、30 cm 处，用内径 2.0 cm 小型特制土钻隔 10 cm 分层取土，取至 60 cm。土壤带回实验室用 pHB-4 型酸度计测定 pH（土水体积比 1:5），取平均值。

1.2.3 番茄根长密度、土壤酶、土壤微生物

土壤水盐监测试验结束后，每试验小区随机选择 3 株植株采集根样，采样范围同水盐监测范围。采用口径 6.0 cm 土钻每隔 10 cm 分层取土，取至 60 cm。样品分装标号，带回实验室。在超净台中用灭菌镊子取出根样，将土壤与根样分离。根样清洗后，用双面扫描仪 (Epson Expression 1600 pro, Model EU-35, Japan) 扫描，用 WinRHIZO 图像分析系统 (WinRHIZO Pro2004b, 5.0，Canada)分析总根长(cm)，计算根长密度。

新鲜土样保存于 4 °C 冰箱，用于后续土壤酶和微生物测定。土壤脲酶活性采用苯酚-次氯酸钠比色法测定，酶活性用 24 h 后每克土生成 NH_3-N 质量表示，mg NH_3-N·g^{-1}·d^{-1}。土壤磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定，以 24 h 后每克土壤释放酚质量表示，mg phenol·g^{-1}·d^{-1}[21]。用无菌水制备土壤悬浮液，采用马丁氏培养基、牛肉膏蛋白胨培养基和改良高氏 1 号培养基分别稀释分离真菌、细菌和放线菌，37 ℃、25 ℃温箱培养，观察菌落生长、计数。每处理每种微生物各分离 3 皿(重复 3 次)，求平均值。

1.3 数据处理

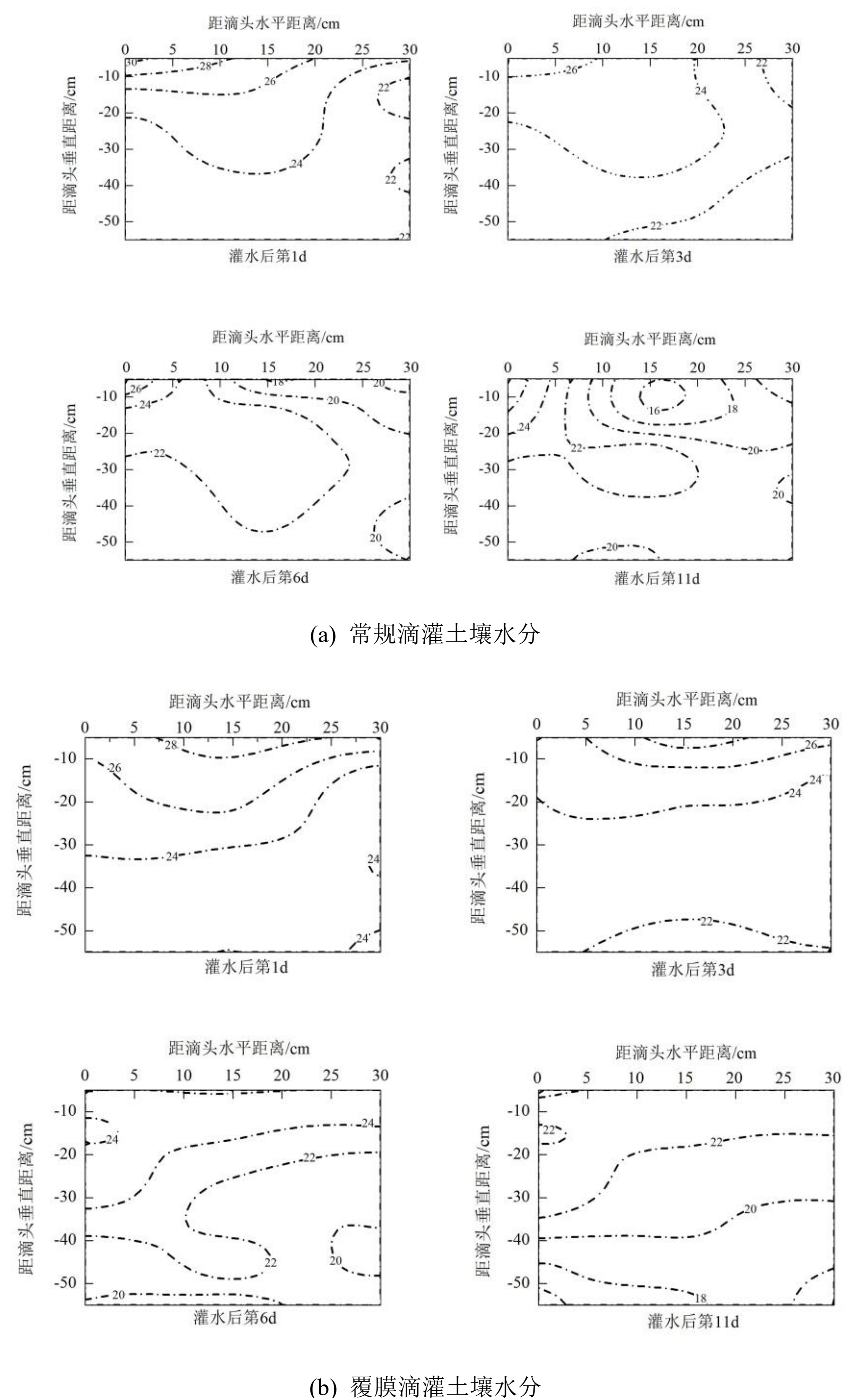
采用 Excel 软件进行数据处理，采用 Originpro 8.5 软件作图，采用 SPSS22 软件进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同滴灌方式对土壤水分运移的影响

本试验灌水下限为 70%田间持水量 （土壤含水率 22%）；试验土壤含水率测定范围：以滴头附近（番茄根部）为中心，垂直滴头水平方向 0~30 cm、垂直方向 0~55 cm（1 650 cm^2）。灌水周期内，土壤水分运移速率以土壤含水率≤20%的土壤面积占矩形面积（1 650 cm^2）比例变化速率为标准进行衡量。

由图 1 可知，常规滴灌，灌水后第 1 d、3d、6 d、11 d 土壤含水率≤20%土壤面积占测定面积分别为 6.71%、14.56%、61.35%、80.33%，平均增速 7.36%·d^{-1}。覆膜滴灌，灌水后第 1 d、3d、6 d、11 d 土壤含水率≤20%土壤面积占测定面积分别为 0%、7.16%、14.58%、45.98%、61.33%，平均增速 6.13%·d^{-1}，显著滞后于常规滴灌（$P<0.05$）。常规滴灌土壤水分整体由土壤深层向表层、番茄根部运移，水分分布不均匀，灌水周期内土壤含水率≥灌水下限（22%）区域为距番茄根部水平方向 0~5 cm、垂直方向 20 cm 以上区域（面积 100 cm^2）。覆膜滴灌土壤水分分布相对均匀，灌水周期内土壤含水率≥灌水下限（22%）区域为距番茄根部水平方向 0~30c m、垂直方向 20 cm 以上区域（面积 600 cm^2），为常规滴灌 5 倍（$P<0.05$）。



(a) 常规滴灌土壤水分

(b) 覆膜滴灌土壤水分

注：图中等值线代表土壤体积含水率（%）

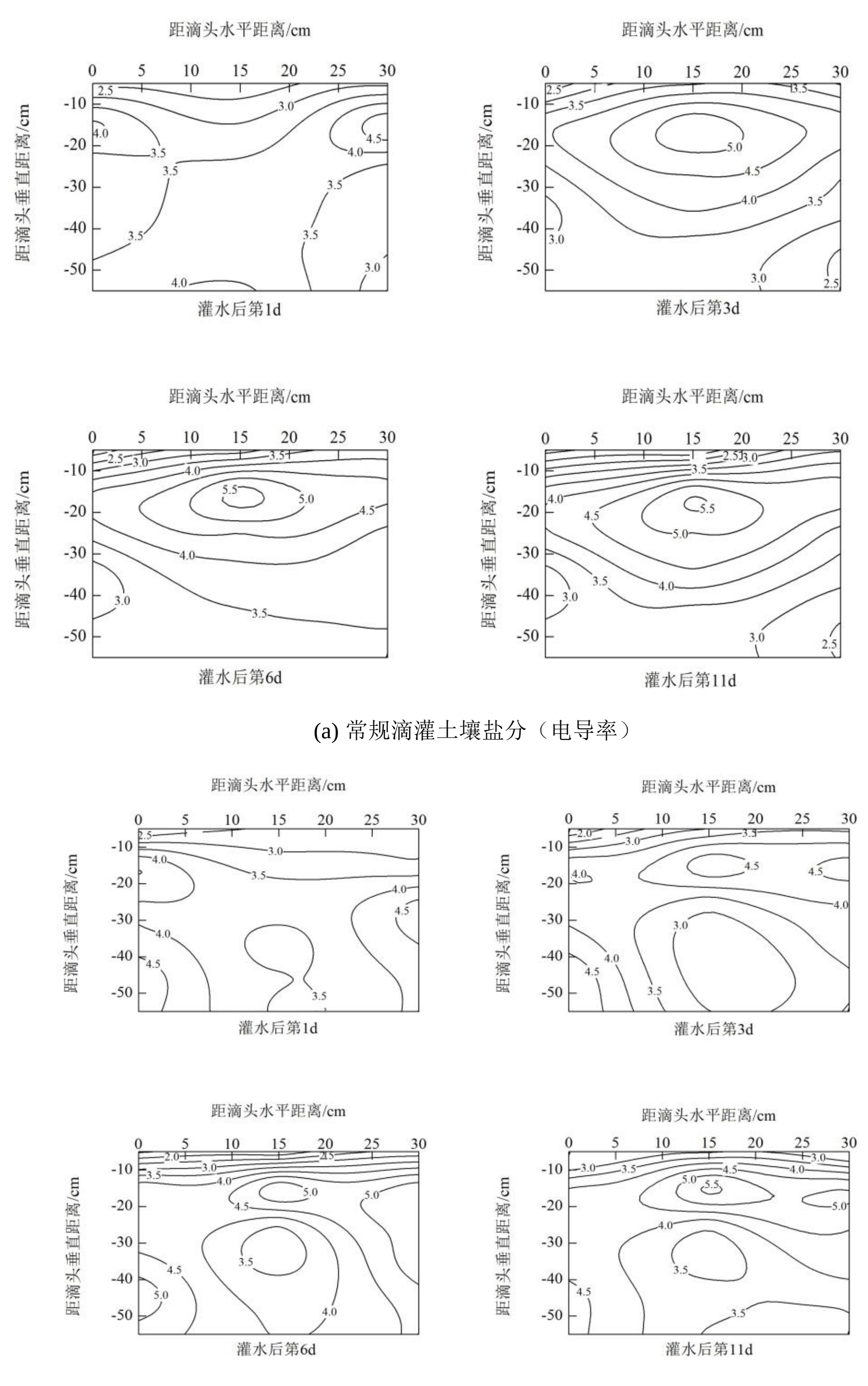
图 1 番茄根区土壤水分运移

Fig. 1 Soil moisture transfer of tomato root zone during irrigation period

2.2 不同滴灌方式对土壤盐分运移的影响

研究表明土壤电导率与可溶性盐含量显著相关，其变化趋势能代表可溶性盐变化趋势[22-23]，本试验通过测定土壤电导率动态变化（图 2），分析土壤可溶性盐变化趋势，测定范围同土壤水分。结果表明，灌水后土壤盐分总体随水分由土壤深层向表层、番茄根部运移；灌水周期内，两种滴灌方式土壤表层都发生盐分聚集 （土壤电导率≥4.5 ms·cm^{-1}）。常规滴灌，盐分聚集区域

为距番茄根部水平方向 5~30 cm、垂直方向 12.5~35 cm；覆膜滴灌，盐分聚集区域为距番茄根部水平方向 7.5~30 cm、垂直方向 12.5~25 cm。两种滴灌方式土壤盐分聚集速率不同，常规滴灌土壤电导率≥4.5 ms·cm^{-1} 土壤面积占测定面积比例灌水后第 1 d、3 d、6 d、11 d 分别为 0.88%、17.68%、20.39%、23.98%，平均增速 2.31%·d^{-1}，盐分聚集形成于灌水后第 3 d。覆膜滴灌土壤电导率≥4.5 ms·cm^{-1} 土壤面积占测定面积比例灌水后第 1 d、3 d、6 d、11 d 分别为 3.78%、4.33%、16.77%、19.4%，平均增速 1.56%·d^{-1}（显著低于常规滴灌，$P<0.05$），盐分聚集形成于灌水后第 6 d。



(a) 常规滴灌土壤盐分（电导率）

(b) 覆膜滴灌土壤盐分（电导率）

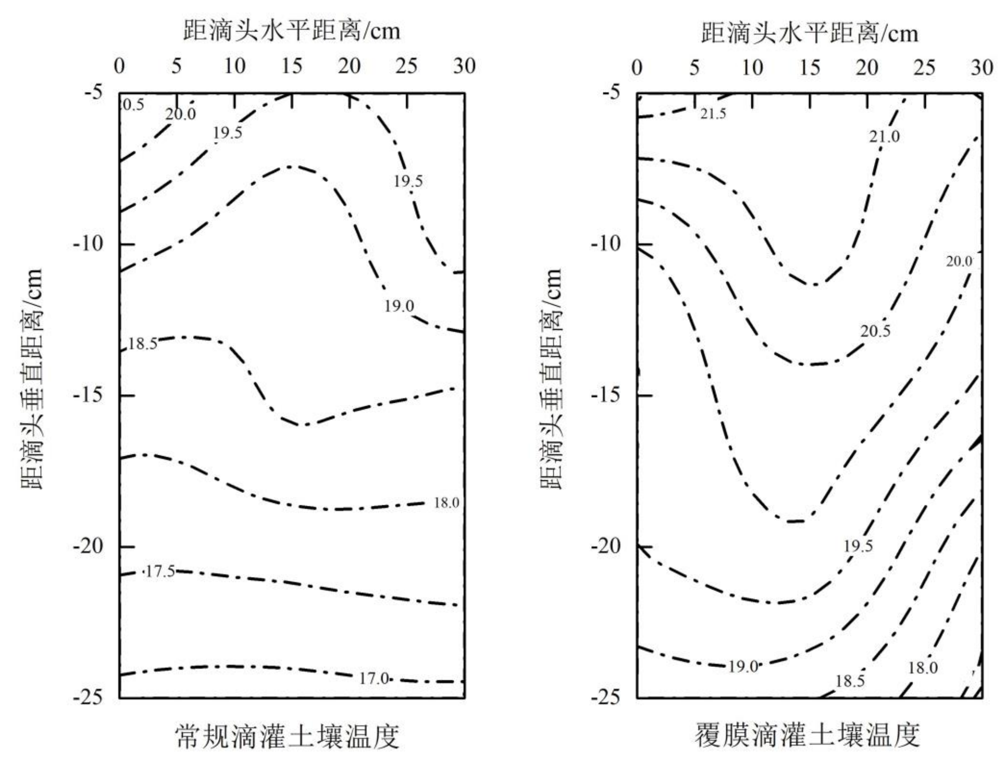
注：图中等值线代表土壤总盐（g·l-1）

图 2 番茄根区土壤盐分（电导率）变化

Fig.2 Changing of soil salt (electric conductivity) in tomato root zone during irrigation period

2.3 不同滴灌方式对土壤温度和 pH 的影响

由图 3 可知，灌水周期内，距番茄根部水平方向 0~30 cm、垂直方向 0~25 cm 区域（750 cm^2）土壤平均温度，覆膜滴灌显著高于常规滴灌（$P<0.05$）。常规滴灌土壤平均温度≥18 ℃区域占测定面积（750 cm^2）的 34.43%，≥20 ℃区域占测定面积的 1.30%。覆膜滴灌土壤温度≥18 ℃区域占测定面积的 97.25%，为常规滴灌的 2.82 倍；≥20 ℃区域占测定面积的 50.53%，为常规滴灌的 38.86 倍。

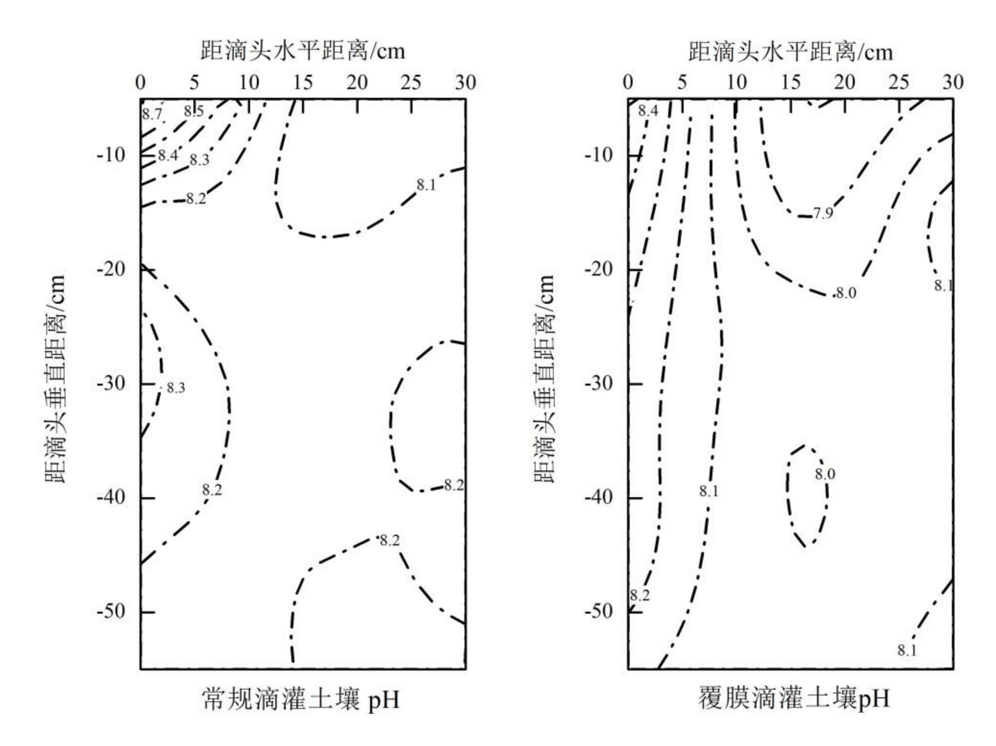


注：图中等值线代表土壤温度（℃）

图 3 番茄根区土壤平均温度

Fig.3 Average temperature of tomato root zone during irrigation period

由图 4 可知，以滴头（番茄根部）为中心，以垂直滴头水平方向 0~30 cm、垂直方向 0~55 cm 矩形（面积为 1650 cm^2）内，常规滴灌条件下，8.1≤土壤 pH≤8.8；覆膜滴灌条件下，7.8≤土壤 pH≤8.4，土壤 pH 变化范围显著小于常规滴灌。



注：图中等值线代表土壤 pH

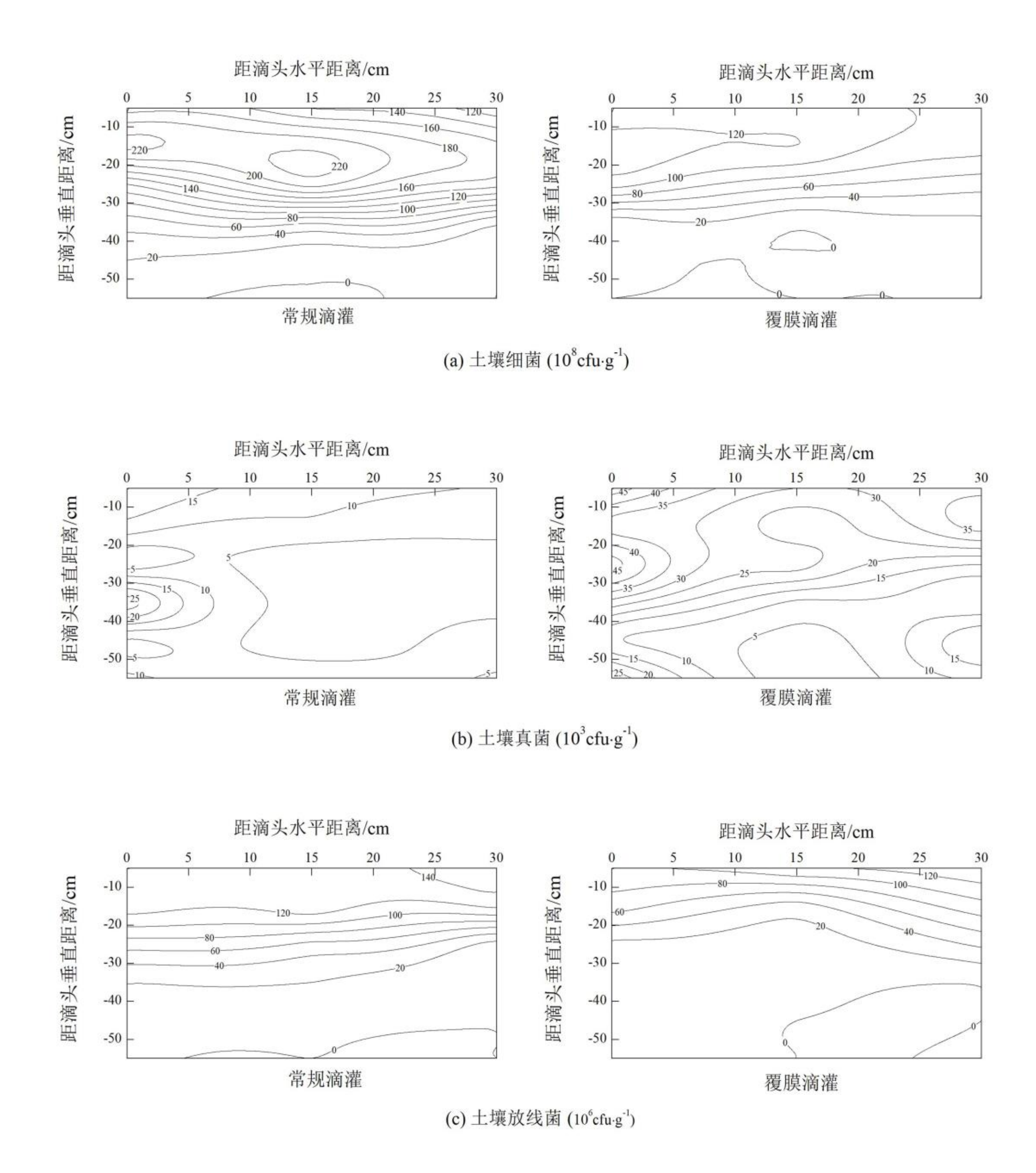
图 4 番茄根区土壤 pH

Fig.4 Soil pH of tomato root zone during irrigation period

2.4 不同滴灌方式对土壤微生物和酶活性的影响

常规滴灌土壤细菌（60×10^8~220×10^8 cfu·g^{-1}）聚集分布在距番茄根部水平方向 0~10 cm、垂直方向 0~35 cm 区域内；覆膜滴灌土壤细菌分布则相对均匀，距番茄根部水平方向 0~10 cm、垂直方向 0~35 cm 区域内土壤细菌含量 40×10^8~120×10^8 cfu·g^{-1}，显著低于常规滴灌（P<0.05）。

与常规滴灌相比，覆膜滴灌土壤真菌聚集分布（图 5b），距番茄根部水平方向 0~30 cm、垂直方向 0~30 cm 区域内土壤真菌含量 15×10^3~45×10^3 cfu·g^{-1}；而常规滴灌为 5×10^3~15×10^3 cfu·g^{-1}，显著低于覆膜滴灌（P<0.05），且分布相对均匀。两种滴灌土壤放线菌都聚集分布于距番茄根部垂直方向 25 cm 以上区域（图 5c），常规滴灌土壤放线菌含量 60×10^6~160×10^6 cfu·g^{-1}，覆膜滴灌为 20×10^6~140×10^6 cfu·g^{-1}，显著小于常规滴灌（P<0.05）。



注：图中等值线代表土壤微生物量

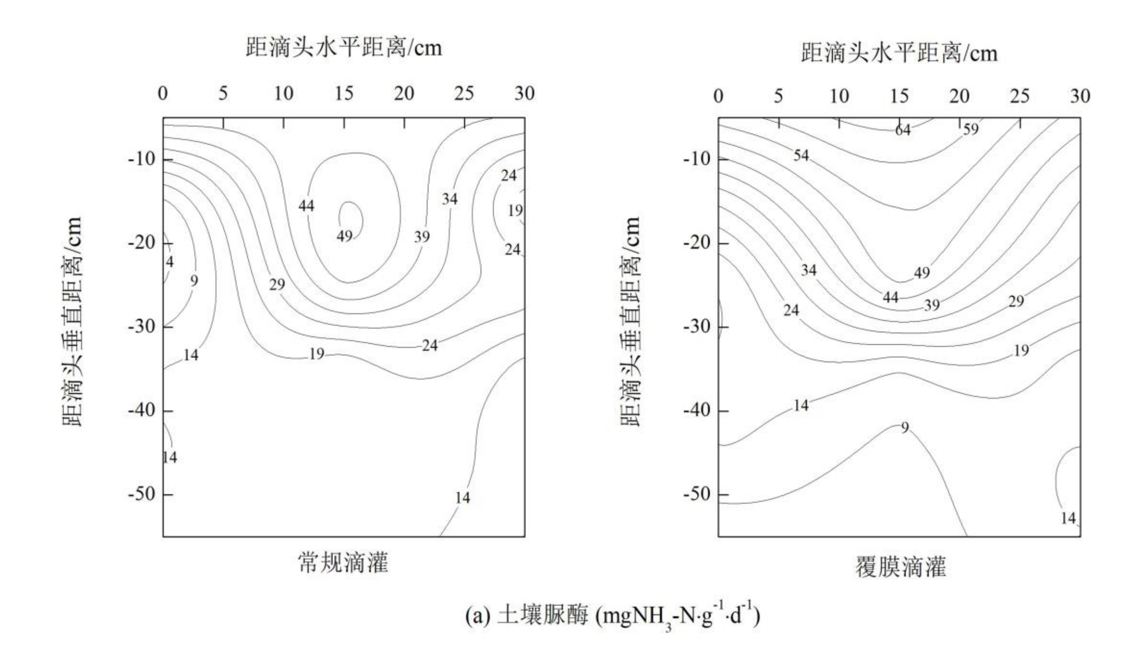
图 5 番茄根区土壤微生物

Fig.5 The soil microorganism of tomato root zone

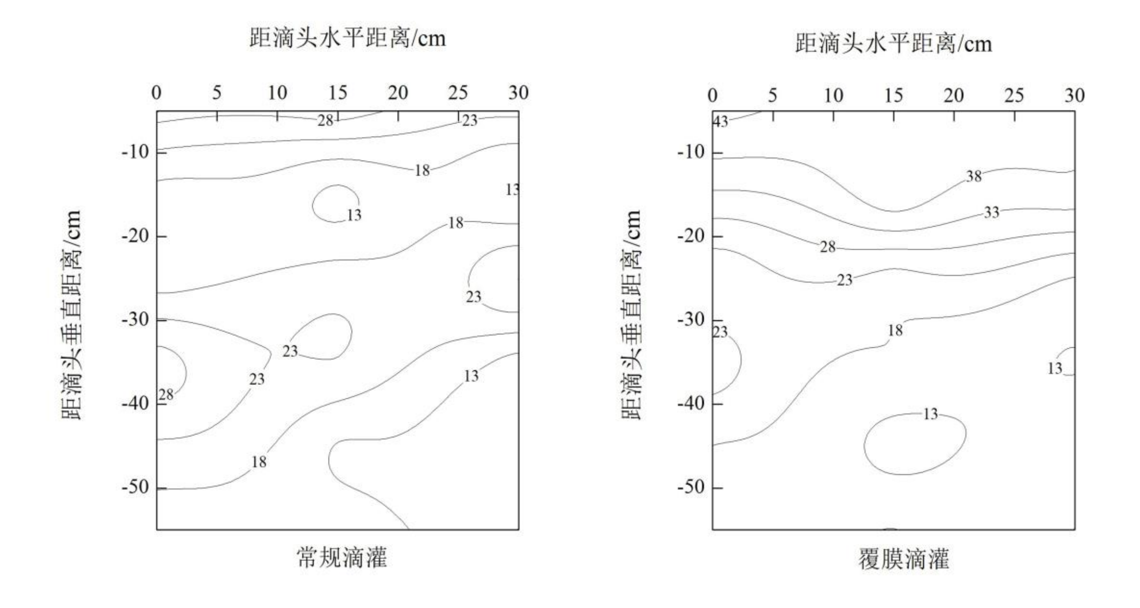
两种滴灌番茄根区土壤脲酶活性分布类似（图 6a），距番茄根部垂直方向 35 cm 以上区域脲酶活性大于其他区域，最大值在距番茄根部水平方向 15 cm 处，向两边递减；但覆膜滴灌土壤脲酶活性 29~64 mgNH_3-N·g^{-1}·d^{-1}显著高于常规滴灌的 24~49 mgNH_3-N·g^{-1}·d^{-1}（P<0.05），提高 20.83%~30.61%。常规滴灌土壤脲酶活性分布比覆膜滴灌均匀，距番茄根部垂直方向 35 cm 以下区域，脲酶活性 19 mgNH_3-N·g^{-1}·d^{-1}的区域占测定面积的 85.46%， 为覆膜滴灌（28.24%）的 3 倍（P<0.05）。

由图 6b 可知，常规滴灌土壤磷酸酶活性分布相对分散，土壤磷酸酶活性 13~26 mg phenol·g^{-1}·d^{-1}；覆膜滴灌土壤磷酸酶活性则从表层土壤向深层逐渐减弱，距番茄根部垂直方向 25

cm 以上区域土壤磷酸酶活性 23~48 mg phenol·g^{-1}·d^{-1}，显著高于常规滴灌（P<0.01），提高 76.92%~84.61%。



(a) 土壤脲酶 (mgNH_3-N·g^{-1}·d^{-1})



(b) 土壤磷酸酶 (mg phenol·g^{-1}·d^{-1})

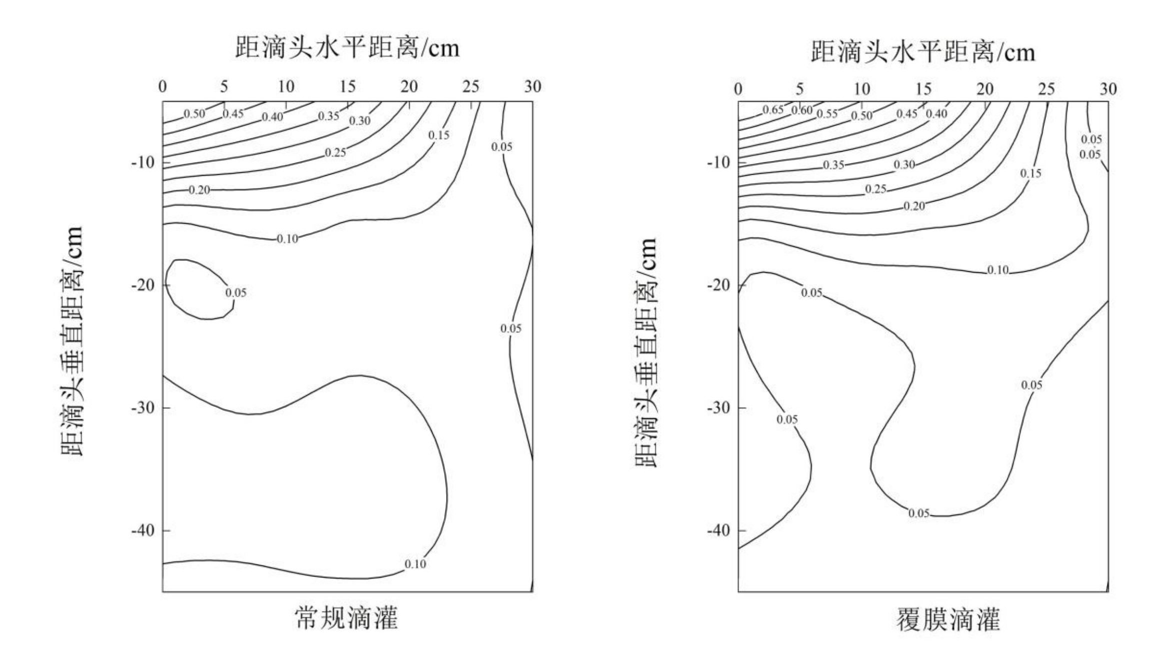
注：图中等值线代表土壤酶活性

图 6 番茄根区土壤酶

Fig.6 Soil enzyme of tomato root zone

2.5 不同滴灌方式对根长密度的影响

由图 7 可知，番茄根系主要分布在距番茄根部水平方向 0~25 cm、垂直方向 15 cm 以上区域，常规滴灌番茄根长密度 0.054~0.554 cm·cm^{-3}，显著小于覆膜滴灌的 1.54~7.04 cm·cm^{-3}。随距番茄根部水平方向、垂直方向距离增加，番茄根长密度整体呈减小趋势。



注：图中等值线代表番茄根长密度（cm·cm^{-3}）

图 7 番茄根区根长密度

Figure 7 The root length density of tomato root zone

2.6 相关性分析

由表 2 可知，常规滴灌根长密度与土壤磷酸酶显著正相关。土壤水分与温度、脲酶、磷酸酶显著正相关。土壤 pH 与土壤真菌、放线菌显著正相关。土壤脲酶与磷酸酶、放线菌显著正相关。土壤磷酸酶与真菌显著正相关。

由表 3 可知，覆膜滴灌根长密度与土壤水分、脲酶、磷酸酶、真菌、放线菌显著正相关，与土壤电导率显著负相关。土壤水分与温度、脲酶、磷酸酶、细菌、真菌、放线菌显著正相关，与土壤电导率显著负相关。土壤脲酶、磷酸酶还与细菌、真菌、放线菌、土壤温度显著正相关。土壤脲酶与磷酸酶显著正相关，3 种微生物相互之间显著正相关。

表2 常规滴灌番茄根区土壤环境因子相关性分析

Table 2 Correlation analysis of soil environmental factors in tomato root area under drip irrigation with unfilmed

	根长密度	土壤水分	土壤电导率	温度	pH	土壤脲酶	土壤磷酸酶	细菌	真菌	放线菌
根长密度	1	0.406	-0.106	0.229	0.513	0.365	0.732**	-0.624*	0.286	0.650
土壤水分		1	-0.012	0.555*	0.124	0.563*	0.508*	0.009	-0.171	0.433
土壤电导率			1	0.090	0.176	-0.204	0.04	0.087	0.316	-0.609
温度				1	0.103	0.798**	0.659**	0.376	0.458	-0.143
pH					1	0.307	0.310	-0.418	0.494*	0.898**
土壤脲酶						1	0.615**	0.082	0.388	0.831**
土壤磷酸酶							1	-0.192	0.493*	0.466
细菌								1	-0.056	-0.645
真菌									1	-0.01

放线菌	1

注：*代表差异达显著（P<0.05），**代表差异达极显著（P<0.01），下同。

表3 覆膜滴灌番茄根区土壤环境因子相关性分析

Table 3 Correlation analysis of soil environmental factors in tomato root area under drip irrigation with filmed

	根长密度	土壤水分	土壤电导率	温度	pH	土壤脲酶	土壤磷酸酶	细菌	真菌	放线菌
根长密度	1	0.626*	-0.69**	0.750*	0.280	0.660**	0.660**	0.470	0.530*	0.520*
土壤水分		1	-0.510*	0.840**	-0.044	0.830**	0.800**	0.820**	0.715**	0.780**
土壤电导率			1	-0.730*	0.052	-0.500*	-0.420	-0.250	-0.280	-0.520*
温度				1	-0.028	0.767*	0.938**	0.600	0.440	0.670*
pH					1	-0.200	0.016	0.110	0.430	-0.080
土壤脲酶						1	0.850**	0.780**	0.530*	0.770**
土壤磷酸酶							1	0.820**	0.670**	0.850**
细菌								1	0.749**	0.730**
真菌									1	0.600**
放线菌										1

3. 讨论

3.1 覆膜滴灌显著优化根区微域环境

本研究发现，覆膜滴灌能使番茄根部水平方向0~30 cm、垂直方向20 cm 以上区域土壤含水率始终高于灌水下限，显著优于常规滴灌。戚迎龙等[24]发现，覆膜滴灌降低膜下土壤水分消耗，这与笔者研究结果类似，但其未对根系参与的水盐运移速率及规律进行探究。笔者发现两种滴灌番茄根区土壤水分都于灌水后第3 d由土壤深层向表层、番茄根部运移，但覆膜滴灌土壤水分迁移速率显著滞后于常规滴灌，原因为一是裸土蒸发高于覆膜土壤[25]；二是覆膜提高土壤温度，虽会加快土壤水分迁移，但薄膜阻碍土壤水分与大气中水汽交换，促使土壤水汽在膜下凝结，减少土壤水分蒸发[4]。

土壤盐分随水分迁移，两种滴灌方式都在土壤表层发生盐分聚集现象，但覆膜滴灌盐分聚集速率低于常规滴灌，这是由于覆膜表层土壤含水率相对较高，进而抑制深层土壤水盐向上迁移。另外，覆膜滴灌土壤垂直剖面干湿交替频率相对低于常规滴灌，也抑制土壤盐分向上迁移。周和平等[26]发现，覆膜可抑制盐分向土壤表层聚集，这与本文结果相似，但其未对根系参与作用进行研究。土壤盐分迁移与根系生理活性相关[27]，根系在吸收水分及养分过程中会将盐分富集到根系周围的土壤[28]。本试验测定发现，覆膜滴灌比常规滴灌更能促进根系生长，但覆膜滴灌浅层土壤含水率显著高于常规滴灌，根系的缺水胁迫低于常规滴灌，可能造成植株蒸腾低于常规滴灌，对水分吸收利用速度减缓，因而迟缓水盐迁移，造成覆膜滴灌垂直剖面土壤盐分聚集速率低于常规滴灌。

土壤水盐运移及分布影响土壤pH，试验发现覆膜滴灌土壤pH显著低于常规滴灌，原因是常规滴灌土壤高蒸发量造成的相对较高缺水胁迫促进根系水分吸收，增强根系表面水盐交换，提高根域土壤pH[29]。与常规滴灌相比，覆膜滴灌显著提高番茄根区土壤温度和表层根域（距根部水

平方向0~25 cm、垂直方向0~5 cm）根系密度，这可增强土壤胶体交换性阳离子水解作用从而提高土壤pH，但其土壤pH却低于常规滴灌，这是由于覆膜滴灌浅层土壤缺水胁迫较低，降低了根系表面水盐交换造成的[30]。与常规滴灌相比，覆膜滴灌总体上能使番茄根区形成一个相对湿润、温度较高、盐分较少聚集的土壤区域，并促进根系生长。

3.2 覆膜滴灌增强“土壤-微生物及酶-根系”的交互作用

李文[31]研究发现，覆膜滴灌对细菌生长影响较小，而对真菌影响显著，这与本文部分结果一致。本研究还发现，常规滴灌显著促进番茄根部表层根域（距根部水平方向 0~35 cm、垂直方向 0~25 cm）放线菌生长，覆膜滴灌则显著促进表层根域（距根部水平方向 0~30 cm、垂直方向 0~30 cm）真菌生长。两种滴灌方式造成土壤水、盐、热等环境因素不同，且不同微生物生长生态位不同[32]，使其空间分布差异增强，这有利于微生物群落动态稳定，提高土壤、微生物、根系相互作用而最大限度利用土壤养分，促进根系及作物生长[33]。

相关性分析表明（表2），常规滴灌一定程度上增强了“土壤-微生物及酶”、“根系-土壤酶”相互作用，有利于土壤脲酶、磷酸酶活性提高，但测定指标却表明常规滴灌土壤脲酶和磷酸酶活性低于覆膜滴灌。张星[34]研究表明，覆膜滴灌调控可显著提高土壤脲酶活性、促进土壤氮素转化，这与本文结果一致。土壤酶不但来源于微生物，还受作物根系及“根系-微生物”交互作用的影响[35]。与常规滴灌相比，覆膜滴灌进一步增加“土壤-微生物及酶-根系”交互作用（表3），有利于提高土壤酶活性[35]。其原因是在番茄根系主要分布区，覆膜滴灌根长密度为常规滴灌的12.8~28.5倍，虽常规滴灌整体上促进了微生物生长，但覆膜滴灌显著促进根系生长，增强“土壤-微生物及酶-根系”交互作用，进而提高土壤脲酶和磷酸酶活性和促进根系对氮磷等养分吸收[36-37]。因此，相比于常规滴灌，覆膜滴灌更能形成较为适宜根系生长的土壤环境。

4. 结论

与常规滴灌相比，在灌水周期内，覆膜滴灌减缓水分迁移、降低盐分聚集度、提高土壤温度和降低土壤pH，优化根区微域环境；显著提高根系密度，根区表层土壤根长密度为常规滴灌的12.8~28.5倍，增强“土壤-微生物及酶-根系”交互作用，提高土壤脲酶和磷酸酶活性。但覆膜滴灌条件下，微生物群落与根系生长具体交互机制还有待深入研究。

[参考文献]

[1] Venot J P, Zwarteveen M, Kuper M, et al. Beyond the promises of technology: A review of the discourses and actors who make drip irrigation[J]. Irrigation and Drainage, 2014, 63(2): 186-194.

[2] Skaggs T H, Trout T J, Rothfuss Y. Drip irrigation water distribution patterns: effects of emitter rate, pulsing, and antecedent water[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(6): 1886-1896.

[3] Liu S, Kang Y, Wan S, et al. Water and salt regulation and its effects on *Leymus chinensis* growth under drip irrigation in saline-sodic soils of the Songnen Plain[J]. Agricultural water management, 2011, 98(9): 1469-1476.

[4] Hanson B R, Šimůnek J, Hopmans J W. Evaluation of urea-ammonium-nitrate fertigation with drip irrigation using numerical modeling[J]. Agricultural Water Management, 2006, 86(1-2):102-113.

[5] Sun J, Kang Y, Wan S, et al. Soil salinity management with drip irrigation and its effects on soil hydraulic properties in north China coastal saline soils[J]. Agricultural Water Management, 2012, 115: 10-19.

[6] Mmolawa K, Or D. Root zone solute dynamics under drip irrigation: A review[J]. Plant and Soil, 2000, 222(1-2): 163–190.

[7] Ramakrishna A, Tam H M, Wani S P, et al. Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation

and yield of ground-nut in northern vietnam[J]. Field Crops Research, 2006, 95(23)115–125.

[8] Phogat V, Mahadevan M, Skewes M, et al. Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip irrigation of almond and implications of system design[J]. Irrigation Science, 2012, 30(4): 315–333.

[9] Muhr J, Franke J, Borken W. Drying-rewetting events reduce C and N losses from a Norway spruce forest floor[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42: 1303–1312.

[10] Nihorimbere V, Ongena M, Smargiassi M, et al Beneficial effect of the rhizosphere microbial community for plant growth and health[J]. BiotechnolAgronSoc, 2011, 15:327–337.

[11] Yao X, Min H, Lü Z, et al. Influence of acetamiprid on soil enzymatic activities and respiration[J]. European Journal of Soil Biology, 2006, 42(2): 120–126.

[12] Badiane N N Y, Chotte J L, Patea E, et al. Use of soil enzyme activities to monitor soil quality in natural and improved fallows in semi-arid tropical regions[J]. Applied Soil Ecology, 2001, 18: 229–238.

[13] Bendinga G D, Turnera M K, et al. Microbial and biochemical soil Quality indicators and their potential for differentiating area sunder contrasting agricultural management regimes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36: 1785–1792.

[14] Hamilton EW, Frank DA. Can plants stimulate soil microbes and their own nutrient supply? Evidence from a grazing tolerantgrass[J]. Ecology, 2001, 82:2397–2402.

[15] Girvan M S, Bullimore J, Pretty J N, et al. Soil type is the primary determinant of the composition of the total and active bacterial communities in arable soils[J]. Applied & Environmental Microbiology, 2003, 69:1800–809.

[16] Rousk J, Baath E, Brookes PC, et al. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil[J]. ISME J, 2010, 4:1340–351.

[17] Frey S D, Knorr M, Parrent J L, Simpson R T. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests[J]. Forest Ecology & Management, 2004, 196:159–171.

[18] Chaparro J M, Sheflin A M, Manter D K, et al. Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility[J]. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(5):489–499.

[19] 孙池涛，张俊鹏，张谦，等. 起垄沟播和常规平播下滴灌棉田土壤水盐的运移[J]. 干旱区研究，2019, 36(2):42-48. [Sun Chitao, Zhang Junpeng, Zhang Qian, et al. Soil water and salt migration in cotton field in ridge furrow planting and conventional flat planting under drip irrigation[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2): 307-313]

[20] Skaggs T H, Trout T J, Rothfuss Y. Drip irrigation water distribution patterns: effects of emitter rate, pulsing, and antecedent water[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(6): 1886–1896.

[21] 关松荫.土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社，1986. [Guan Songyin. Soil Enzymology and its Research Methods[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986.]

[22] 张建兵，杨劲松，姚荣江，等. 有机肥与覆盖方式对滩涂围垦农田水盐与作物产量的影响[J]. 农业工程学报，2013, 29(15):116﹣125. [Zhang Jianbing, Yang Jinsong, Yao Rongjiang, et al. Dynamics of soil water, salt and crop growth under farmyard manure andmulching in coastal tidal flat soil of northern Jiangsu Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 29(15):116-125.]

[23] 孙贯芳，屈忠义，杜斌，等. 不同灌溉制度下河套灌区玉米膜下滴灌水热盐运移规律[J]. 农业工程学报，2017, 33(12): 152–160. [Sun Guanfang, Qu Zhongyi, Du Bin, et al. Water-heat-salt effects of mulched drip irrigation maize with different irrigation scheduling in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(12):144-152.]

[24] 戚迎龙，史海滨，李瑞平，等. 滴灌水肥一体化条件下覆膜对玉米生长及土壤水肥热的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5):99-110. [Qi Yinlong, Shi Haibin, Li Ruiping, et al. Effects of film mulching on maize growth and soil water, fertilizer and heat under fertigation of drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(5):99-110.]

[25] 吴友杰. 基于稳定同位素的覆膜灌溉农田 SPAC 水分传输机制与模拟[D]. 北京：中国农业大学, 2017. [Wu Youjie. Water Transfer Mechanism and Simulation of SPAC in Irrigated and Film-mulching Farmland based on Stable Isotope[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.]

[26] 周和平, 王少丽, 吴旭春. 膜下滴灌微区环境对土壤水盐运移的影响[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 816-824. [Zhou Heping, Wang Shaoli, Wu Xuchun. Micro drip irrigation district environmental impact on soil water and salt transport[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6): 816-824.]
[27] Kitano M, Urayama K, Sakata Y, et al. Water and salt movement in soil driven by crop roots: a controlled column study[J]. Biologia, 2009, 64(3): 474–477.
[28] Rengasamy P. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils[J]. Functional Plant Biology, 2010, 37(7): 613–620.
[29] Murtaza B, Murtaza G, Ziaurrehman M, et al. Reclamation of salt-affected soils using amendments and growing wheat crop.[J]. Soil in the Environment, 2011, 30(2): 130-136.
[30] Miller E K, Blum J D, Friedland A J. Determination of soil exchangeable-cation loss and weathering rates using Sr isotopes[J]. Nature, 1993, 362(6419):438–441.
[31] 李文. 灌溉方式对设施土壤微生物学特性的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2017. [Li Wen. Impact of Irrigation Management on Greenhouse Soil Microbial Characteristics[D]. Shenyang:Shenyang Agricultural University, 2017.]
[32] Kaymak H C. Plant growth and health promoting bacteria. In: Maheshwari DK (ed) Microbiology Monographs[D]. Berlin: Springer-Verlag, 2011, 18:45–79.
[33] Potvin W C. Biodiversity and ecosystem functioning: importance of species evenness in an old field[J]. Ecology, 2000, 81(4):887–892.
[34] 张星. 日光温室滴灌水热调控对土壤氮素动态和酶活性及白菜生长的影响[D]. 北京：中国水利水电科学研究院, 2017. [Zhang Xing. Effects of Water-heat Regulating with Drip Irrigation on Nitrogen Dynamics, Soil Enzyme Activities and Chinese Cabbage Growth in Solar-heated Greenhouse[D]. Beijing:China Institute of Water Resources and Hydropower Resrarch, 2017.]
[35] Kotroczó Z, Veres Z, Fekete I, et al. Soil enzyme activity in response to long-term organic matter manipulation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 70: 237–243.
[36] Cookson P. Spatial variation of soil urease activity around irrigated date palms[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 1999, 13(2): 155-169.
[37] Firsching B M, Claassen N. Root phosphatase activity and soil organic phosphorus utilization by Norway Spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(11):1417–1424.

Effects of film mulched drip irrigation on tomato soil physical, chemical and biological characteristics in greenhouse

Jingwei Wang[1, 2], Leiyuan Wang[3], Yuan Li[2, 4], Wenquan Niu[2, 5*]

(1.*School of Resources and Environment*，*Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, Shanxi, China*; 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *Shaanxi, China*; 3. *School of Public Administration*，*Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, Shanxi, China;* 4. *Northwest Land and Resources Research Center, Shaanxi Normal University, Xi'an, 710119, Shaanxi, China*; 5. *Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling* 712100, *Shaanxi, China*;)

Abstract： To investigate the law of soil water and salt transport in crop root-zone as well as its effects on “soil-microorganisms and enzymes-root” interaction under the condition of mulching drip irrigation, and further enhance the efficiency of water and fertilizer utilization and improve the precision irrigation system, a field experiment in greenhouse was carried out in this study. For the experiment, tomatoes were taken as the research object and the method of dynamic monitoring

in continuous irrigation cycles was used. And, the effects of conventional drip irrigation (CDI) and film mulched drip irrigation (FDI) on the dynamic changes of soil moisture and salt in tomato root-zone, as well as the effects on tomato root growth, soil microorganisms and enzymes were studied. Further, the interactions among soil environmental factors, soil microorganism, enzyme and root growth were analyzed. The results showed that: (1) compared with CDI, soil water transfer rate under FDI was significantly lower, soil water distribution was relatively uniform, and the soil area maintaining the lower limit of soil moisture content (22%) within the determination range was 5 times of that of CDI ($P<0.05$); (2) the local salt accumulation rate decreased by 50% and the degree of local salt accumulation decreased by FDI than under CDI; (3) root-zone soil temperature and pH were significantly increased and decreased by FDI, respectively; (4) the root length density of the surface soil in FDI was 12.8~28.5 times that of CDI. These changes created by FDI further strengthened “soil-microorganisms and enzymes-root” interaction and improved soil urease activity by 20.83%~30.61% and soil phosphatase activity by 76.92%~84.61% than CDI. Therefore, compared with CDI, FDI has more potential to improve the utilization efficiency of water and soil resources. However, relevant agronomic measures of FDI need to be further refined and improved to provide reference for further improving water and soil utilization efficiency.

Keywords: film mulched; drip irrigation; soil microorganisms; soil enzymes; root length density.